

9. savjetovanje HRO CIGRÉ
Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.

Ivan Sitar
KONČAR – D&ST d.d.
ivan.sitar@koncar-dst.hr

Sandra Nedić
KONČAR – D&ST d.d.
sandra.nedic@koncar-dst.hr

UTJECAJ NOVIH IZOLACIJSKIH MATERIJALA NA KARAKTERISTIKE I IZVEDBU ULJNIH TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Izbor kombinacije ulja i izolacijskih materijala u transformatoru određuje njegova svojstva, te direktno utječe na područje njegove primjene u odnosu na definirane specifičnosti i radne uvjete transformatora.

Sustave izolacije transformatora u kojima je kao kruta izolacija korišten materijal više toplinske klase ili kombinacija takvih materijala s klasičnom izolacijom od celuloze, a kao tekući dielektrik mineralno ulje ili jedno od novih vrsta ulja, nazivamo nekonvencionalni izolacijski sustavi. Optimalan izbor izolacijskih materijala izvodi se u fazi projektiranja u skladu s definiranim radnim uvjetima transformatora.

U referatu su prikazane karakteristike transformatora s nekonvencionalnim izolacijskim sustavom, navedeni su faktori koji utječu na izbor tipa izolacijskog sustava i transformatorskog ulja, te je dan usporedni prikaz graničnih i tipičnih zagrijanja konvencionalnih i nekonvencionalnih sustava u odnosu na korišteno ulje i izolacijski sustav. Na primjeru je navedena usporedba primjene različitih izolacijskih sustava na ukupnu masu transformatora, uz kratki osvrt na razvoj transformatora za elektromotorni vlak kao primjer primjene nekonvencionalnog izolacijskog sustava iz prakse.

Ključne riječi: uljni transformator, nekonvencionalni izolacijski sistemi, distributivni transformator
specijalni lokomotivski transformator

INFLUENCE OF NEW INSULATION MATERIALS ON CHARACTERISTICS AND DESIGN OF OIL TRANSFORMERS

SUMMARY

The choice of combination of oil and insulation material specifies transformer properties and directly influences on its field of application according to defined characteristics and working conditions of transformer.

Un-conventional insulation systems are transformer insulation systems where material of high thermal class or a combination of such materials with classic cellulose insulation is used as hard insulation, while at the same time mineral or some other type of oil is used as liquid dielectric. Optimal choice of insulation material is defined in design stage in respect to defined working conditions of transformer.

This paper describes characteristics of transformer with un-conventional insulation systems, states factors that influence on choice of type of insulation system and transformer oil. Also, comparative overview of maximum and typical temperature rise values for conventional and unconventional systems is given, according to insulation system and oil used. The example with comparison how different designs of insulation systems influence on change in total mass of transformer is given, with a short review on development of transformer for EMU as an example of application of un-conventional insulation system.

Key words: liquid-immersed transformers, un-conventional insulation systems, distribution transformers, special locomotive transformer

1. UVOD

Izolacijski materijali u uljnim transformatorima najčešće su mineralno ulje kao tekući dielektrik i kruta izolacija na bazi celuloze. Ovakav izolacijski sustav nije se mijenjao zadnjih sto godina, praktički od izuma transformatora. Tijekom čitavog tog perioda metode projektiranja i tehnologija gradnje transformatora su stalno usavršavani, imajući za rezultat da je transformator danas jedan od najpouzdanijih proizvoda elektrostrojarske industrije.

Pojava novih vrsta ulja kao tekućeg dielektrika i rashladnog medija je omogućila širu primjenu materijala viših toplinskih klasa kao krute izolacije transformatora. Da bi se bolje iskoristile karakteristike novih i najčešće skupljih materijala, osigurala njihova optimalna upotreba i proizveo barem jednako tako pouzdan proizvod kao s konvencionalnim materijalima, bilo je potrebno donijeti i usvojiti dodatne standarde za projektiranje i gradnju transformatora u novim tehnologijama, [1].

Prema [2] u periodu od 2005. do 2008. godine u Americi, Europi i Australiji proizvedena su i stavljena u pogon 73 energetska transformatora s nekonvencionalnim izolacijskim sistemom ukupne snage 2458,5 MVA, pri čemu je najveća jedinica nazivne snage 212 MVA i napona 230 kV (GSU). U istom je periodu kod 42 energetska transformatora ukupne snage 880 MVA zamijenjeno mineralno ulje s nekim od alternativnih transformatorskih ulja. Prema rezultatima provedene ankete od strane CIGRE A2 WG-35 [3], u svijetu je zadnjih trideset godina proizvedeno oko deset tisuća distributivnih transformatora s alternativnim izolacijskim tekućinama. Udio proizvedenih lokomotivskih transformatora s materijalima više toplinske klase punjenih alternativnim izolacijskim tekućinama prelazi 50 % od ukupnog broja proizvedenih transformatora te namjene.

2. IZOLACIJSKI SUSTAVI I GRANIČNE TEMPERATURE ZAGRIJANJA TRANSFORMATORA

2.1. Pregled izolacijskih sustava

Izolacijski sustav transformatora čine jedan ili više krutih izolacijskih materijala koji izoliraju dijelove pod naponom te izolaciona tekućina koja ima dvostruku namjenu: izoliranje, prijenos topline i hlađenje. Oba dielektrika su u pogonu tijekom čitavog vijeka transformatora izloženi električkim, termičkim, kemijskim i mehaničkim naprezanjima. Kao mjerilo podnosivosti termičkih naprezanja izolacijskih materijala uzima se temperatura. Poznato je da kod konvencionalnih izvedbi distributivnih i energetskih transformatora raspodjela temperature u aktivnom dijelu nije homogena. Temperatura ulja pri nazivnom teretu varira od otprilike 70°C na dnu kotla transformatora do 100°C pri vrhu, pod poklopcem. Vodič s izolacijom na mjestu najvećeg zagrijanja, tzv. hot-spot, doseže temperaturu i do 20°C višu od temperature okolnog ulja.

Budući da starenje i životni vijek izolacije najviše ovise o temperaturi, primjena materijala različitih temperaturnih klasa daje više mogućnosti za izvedbu optimalnog rješenja s obzirom na zagrijanje, životnu dob i cijenu proizvoda. Kada se u istom transformatoru koriste izolacijski materijali više različitih toplinskih klasa, za takav transformator se kaže da ima nekonvencionalni izolacijski sustav. Da se postigne optimalno korištenje materijala potrebno je uskladiti toplinsku klasu materijala i lokalnu radnu temperaturu namota transformatora.

Od više mogućih kombinacija izolacijskih sustava u industriji transformatora najčešće se susreću sljedeća četiri: homogeni izolacijski sustav za visoke temperature, hibridni izolacijski sustav, poluhibridni izolacijski sustav i kombinirani izolacijski sustav.

2.1.1. Homogeni izolacijski sustav za visoke temperature.

Homogeni izolacijski sustav za visoke temperature čine kruta izolacija i izolacijske tekućine više toplinske klase. Ako u transformatoru postoje područja gdje temperatura ulja odgovara konvencionalnim vrijednostima, za dijelove kao što su držači i sl. mogu se upotrijebiti materijali koji se koriste u proizvodnji konvencionalnih uljnih transformatora.

2.1.2. Hibridni izolacijski sustav

U hibridnom izolacijskom sustavu upotrebljavaju se mineralno ulje i kruta izolacija za visoke temperature, ali samo onih namota koji se zagrijevaju na više temperature od konvencionalnih, dok su ostali namoti izolirani konvencionalnim materijalima. Materijali za visoke temperature su izolacija vodiča,

radijalni i aksijalni umetci i letvice u direktnom dodiru s vodičem. Cilindri, kape i slični dijelovi koji se nalaze u područjima konvencionalnih temperatura rade se iz materijala na bazi celuloze.

2.1.3. Poluhibridni izolacijski sustav

Poluhibridni izolacijski sustav čine mineralno ulje i izolacija vodiča više toplinske klase samo za one namote koji rade na temperaturama višima od konvencionalnih. U slojnim namotima pod izolaciju vodiča spada i međuslojna izolacija. Svi ostali dijelovi su iz materijala koji se koriste u konvencionalnim uljnim transformatorima.

2.1.4. Kombinirani izolacijski sustav

U kombiniranom izolacijskom sustavu koriste se materijali više toplinske klase samo za one dijelove namota koji su u pogonu izloženi temperaturama višima od konvencionalnih. To su primjerice krajevi namota gdje su povećani gubici i lokalna zagrijanja uslijed izražene radijalne komponente rasipnog magnetskog polja, dijelovi namota ispravljivačkih transformatora u kojima dolazi do koncentracije gubitaka uslijed viših harmonika u struji tereta i sl.

2.2. Granična zagrijanja

Kod konvencionalnih transformatora gdje se koriste materijali na bazi celuloze i mineralno ulje, kruta izolacija određuje maksimalnu radnu temperaturu, odnosno toplinsku klasu transformatora. Kad izolacijski sustav transformatora čine kruta izolacija za visoke temperature i mineralno ulje, ulje će najčešće biti limitirajući faktor i odrediti maksimalna zagrijanja. Zbog toga rashladni sustav takovih transformatora treba termički dimenzionirati da ne dođe do prevelikog zagrijavanja ulja koje bi imalo za posljedicu degradaciju, odnosno prerano starenje ulja i bilo uzrok smanjenja dielektrične čvrstoće cijelog izolacijskog sustava transformatora.

U tablici I su prikazana granična i tipična zagrijanja konvencionalnog i nekonvencionalnih izolacijskih sustava, [1]. Vrijednosti su zamišljene kao granična zagrijanja i u mnogome ovise o specifičnosti projekta. Ako proizvođač nema iskustava i rješenja nisu provjerena na modelima, preporuča se za nazivna zagrijavanja odabrati 5 K niže temperature od prikazanih u tablici I.

Tablica I: Usporedni prikaz dozvoljenih i tipičnih zagrijanja namota i ulja različitih izolacijskih sustava, [1]

Izolaciona tekućina	Mineralno ulje				Esterno ulje	Silikonsko ulje
	Konvencionalni	Kombinirani	Poluhibridni	Hibridni		
Izolacijski sustav					Homogeni	Homogeni
Srednje zagrijanje namota, (K)	65	65	75	95	100	115
Hot-spot zagrijanja namota, (K)	78	110	90	130	135	160
Maksimalno zagrijanje ulja, (K)	60	60	60	60	80	100
Tipično srednje zagrijanje ulja, (K)	50	50	50	50	65	80
Tipični srednji gradijent namota, (K)	15	15	25	45	35	35
Tipični hot-spot gradijent, (K)	18	50	30	70	55	60

3. MATERIJALI I NJIHOV UTJECAJ NA IZVEDBU TRANSFORMATORA

3.1 Kruti izolacijski materijali

U uljnim transformatorima konvencionalne izvedbe najčešće se koristi kruta izolacija na bazi celuloze. Nekonvencionalni izolacijski sustavi su otvorili mogućnosti primjene u transformatorima materijala više toplinske klase. U tablici II su prikazane osnovne karakteristike najvažnijih krutih izolacijskih materijala koji se koriste u konvencionalnim i nekonvencionalnim izolacijskim sustavima za granične temperature i zagrijavanja namota i ulja prema tablici I.

Za izolaciju vodiča se koriste lakovi na bazi poliestera ili poliesterimida u slučaju okrugle žice i temeljnih vodiča TSV-a. Vodiči konvencionalnih uljnih transformatora su najčešće izolirani papirom, običnim kraft, kalandriranim ili termostabilnim. U nekonvencionalnim izolacijskim sustavima osim lak izolacije vodiča više toplinske klase kao osnovna ili dodatna izolacija vodiča najviše se koristi Nomex.

Tablica II. Osnovne karakteristike najvažnijih krutih izolacijskih materijala u izolacijskim sustavima uljnih transformatora

Materijal	Toplinska kl., (°C)	Rel. diel. konst. ϵ_r	tg δ (%) na 25°C	Absorpc. vlage, (%)	Gustoća (g/cm ³)	Oblik
Na bazi celuloze	105	3,3-4,1	0,4	7,0	0,97-1,2	papir
Na bazi celuloze, termostabilni	120	3,3-4,1	0,4	7,0	0,97-1,2	papir
Na bazi celuloze	105	2,9-4,6	0,4	7,0	80	ploča
Bakelitni papir	130	5,8	2,5	2,3	1,36	ploča
Poliester staklo	130-200	4,8	1,3-7,0	0,2-1,1	1,8-2,0	ploča
Aramid (nomex)	220	1,6-3,2	0,5	5,0	0,72-1,1	papir
Aramid (nomex)	220	2,6-3,5	0,5	5,0	0,70-1,15	ploča

3.2 Izolacijske tekućine

U tablici III su prikazane osnovne karakteristike danas raspoloživih izolacijskih tekućina za transformatore. Mineralno ulje se koristi u konvencionalnim uljnim transformatorima i prema njemu se uspoređuju sva ostala ulja. IEC 61100 klasificira izolacijska ulja prema točki zapaljivosti. Ulja klase K imaju točku zapaljivosti veću od 300 °C. Međutim osim točke zapaljivosti o mogućnostima upotrebe ulja na višim temperaturama odlučuju i druge karakteristike kao što su stvaranje taloga, sklonost upijanju vlage, stupanj oksidacije i dr. Maksimalne radne temperature prema tablici III treba shvatiti kao orijentirajuće vrijednosti općenito prihvaćene u industriji budući da danas ne postoje opće usvojene metode za određivanje toplinske klase izolacijskih tekućina.

Tablica III. Osnovna svojstva novih izolacijskih tekućina za transformatore

Izolacijska tekućina	Mineralno ulje	Silikonsko ulje		S. ester Midel 7131	Prirodni ester	
		561 Dow Corning	KF-96-20 Low visc.		FR3	BIO-TEMP
Toplinska klasa, (°C)	105	155	155	130	130	130
Gustoća, 20°C (g/cm ³)	0,88	0,96	0,956	0,97	0,92	0,91
Koeficijent ekspanzije, /°C	0,00075	0,00104	0,00104	0,00075		0,000688
Spec. toplina, 20°C (J/kg K)	1860	1510	1600	1880,0	1883	
Topl. vodljivost, 20°C (W/m K)	0,126	0,151 @50°C	0,15 @25°C	0,144	0,167	0,17
Kinem. viskozitet, 0°C (mm ² /K)	37,5	86	32,8	240	207	300
Točka stiništa, (°C)	-50	<-50	<-60	-60,0	-21	od -15 do -25
Točka zapaljivosti, (°C)	170	>350	312	322	360	360
Probojni napon, kV IEC 60156 2,5 mm	>70	50	70	>70	56 (ASTM 1816)	45 (ASTM D877)
tg δ, (/)na 90°C	<0,002	<0,001	<0,001	<0,006	0,005	0,007
Relativna dielektrična konstanta ε _r	2,2	2,7 @25°C	2,46 @90°C	3,2	3,2	3,2

3.3 Utjecaj materijala na projekt i izvedbu transformatora

Uvođenje novih izolacijskih materijala i alternativnih ulja imaju direktan utjecaj na projekt i izvedbu transformatora i zbog toga su uvijek interesantna razmatranja o čemu sve treba voditi računa u takovim slučajevima.

3.3.1 Projektiranje izolacije

Projektiranje izolacije je jedan od najvažnijih dijelova projekta i usko je povezano s tehnologijom izrade transformatora. Osnovno pitanje koje se postavlja projektantu su podnosivi naponi krutih izolacijskih materijala u kombinaciji s mineralnim uljem ili alternativnim izolacijskim tekućinama. Podaci u literaturi su često kontradiktorni, pa su modeliranje i izrada prototipa jedini sigurni način ovladavanja tehnologijom primjene novih materijala. Probojni napon je jedna od najvažnijih karakteristika za definiranje efikasnosti ulja kao izolatora. Znatno ovisi o kvaliteti ulja, vlazi, stranim česticama i prisustvu plinova u ulju. Ulja na bazi prirodnog estera imaju od 20 do 30 puta veću sposobnost upijanja vlage na 25°C u odnosu na mineralno ulje. To smanjuje utjecaj vlage na probojnu čvrstoću krute izolacije, suši izolaciju vodiča i produžava životni vijek transformatora.

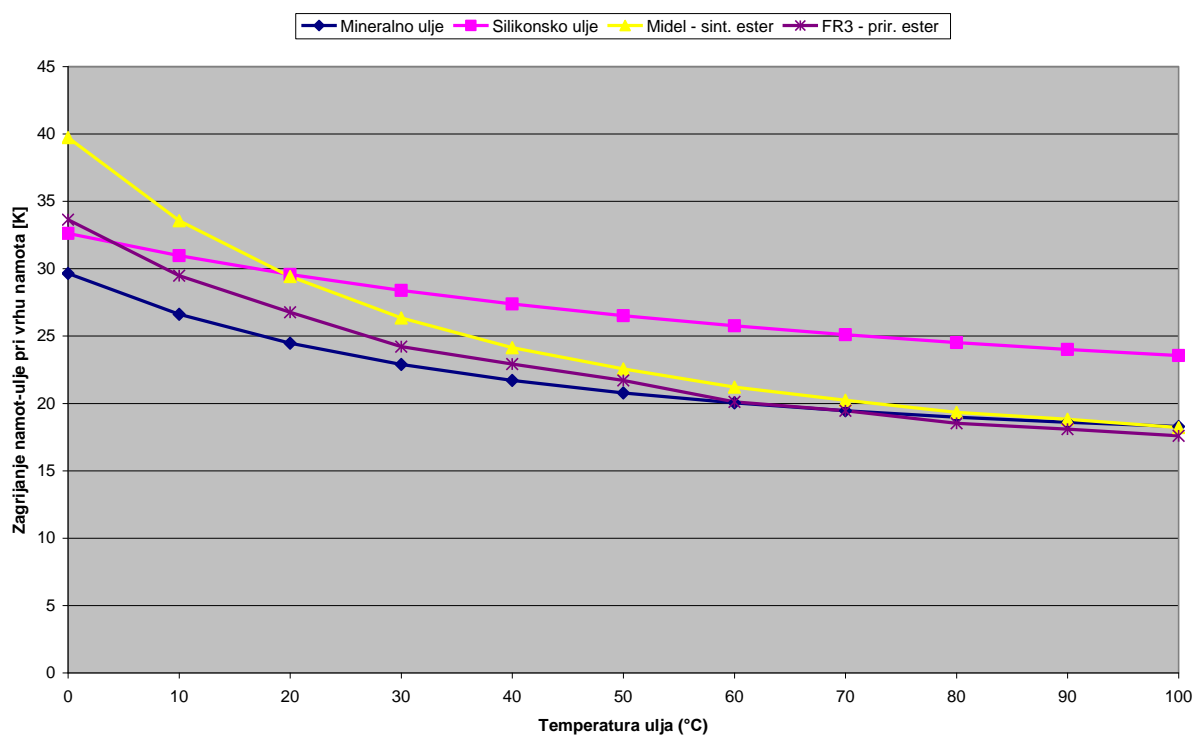
Alternativne izolacijske tekućine imaju veću relativnu dielektričnu konstantu u odnosu na mineralno ulje, dakle bliže su dielektričnosti krute izolacije. Zbog toga se mijenjaju kapaciteti prema masi i raspodjela napona u prijelaznim stanjima i kod udarnog napona. Također se mijenja naprezanje unutar izolacije, manja opterećenja se pojavljuju na uljnim kanalima, što u konačnici rezultira većim podnosivim naponom kod zadanih konfiguracija elektroda i dielektrika.

Probojna čvrstoća prirodnog i sintetičkog estera prema [4] je slična probojnoj čvrstoći mineralnog ulja i veća je od 70 kV, a to je donja granica probojne čvrstoće novog mineralnog ulja prema IEC 60296. Pokazuje se da ulja na bazi prirodnih estera u nehomogenim konfiguracijama imaju i do 36% manju

čvrstoću na udarni napon u odnosu na mineralno ulje. Budući da prema najnovijim istraživanjima rezultati znatno ovise o proceduri ispitivanja, preporučaju se dodatna istraživanja na tom području [5].

3.3.2 Zagrijavanje i hlađenje

Na istoj temperaturi alternativna ulja imaju veći viskozitet od mineralnog ulja. To smanjuje protok ulja kroz kanale u namotima i ima za posljedicu veći gradijent temperature po visini namota. Ovaj efekt je značajan u namotima s prirodnom cirkulacijom ulja, a zanemariv kod prisilnog strujanja gdje pumpa savladava veći hidraulički otpor. Bolja toplinska vodljivost alternativnih ulja donekle to ublažava, smanjujući gradijent između vodiča i lokalnog ulja. Maksimalno ulje je zbroj srednje temperature ulja i pola gradijenta porasta temperature na namotu, pa su kod prirodnog hlađenja hot-spot i maksimalno ulje viši u odnosu na slučaj kada je namot hlađen mineralnim uljem. Koristeći se postupkom računanja opisanim u [6], na primjeru distributivnog transformatora nazivne snage 800 kVA s ONAN hlađenjem je napravljena usporedba zagrijavanja pri vrhu namota u rasponu temperatura od 0° do 100°C za ulja iz tablice III, slika 1. Iz analize proizlazi da u području radnih temperatura od 40°C do 100°C su sva ulja osim silikonskog približno jednaki rashladni medij. Pri višim temperaturama silikonsko ulje je otprilike 30% lošije u pogledu hlađenja. Međutim ispod 0°C silikonsko ulje je dobar rashladni medij, za razliku od esterskih ulja čija se primjena ne preporuča na niskim temperaturama bez dodatnih zahvata na rashladnom sistemu.



Slika 1. Zagrijanje namot-ulje pri vrhu namota hlađenih različitim uljima

Jedna od karakteristika prirodnih estera je da u direktnom dodiru sa zrakom želiraju, osobito na višim temperaturama. Premda taj proces nije brz i ne smanjuje dielektričnu čvrstoću ulja, želatinasti talog sužuje rashladne kanale što dodatno pogoršava efikasnost hlađenja. Zbog toga se transformatori, punjeni prirodnim esterom, moraju konstruirati sa zatvorenim sustavom disanja, gdje membrana iz nitrilne gume odjeljuje ulje u transformatoru od atmosfere. Interesantan je primjer sealed-type transformatora nazivne snage 40/31,5 MVA, napona 110 kV s elastičnim radijatorima koji se deformiraju pri povećanom pritisku u transformatoru i na taj način preuzmu promjenu volumena ulja na povišenoj temperaturi, [7]. Budući da su radijatori sposobni preuzeti temperaturno širenje ulja konzervator više nije potreban. Na taj su se način smanjile ugradbene dimenzije transformatora i ulje odvojilo od direktnog dodira sa zrakom.

3.3.3 Otpornost na naprezanja u kratkom spoju

Transformatori moraju biti projektirani i izvedeni da izdrže naprezanja u slučaju kratkog spoja. Postupak provjere i dokazivanja otpornosti transformatora na kratki spoj je definiran standardom, [8]. Mehanička otpornost transformatora se dokazuje dinamičkim ispitivanjima u laboratorijima za visoke snage, dok se termička provjerava računom. Izolacijski sustav transformatora izložen je u slučaju kratkoga spoja direktno mehaničkim i termičkim napreznjima. Zbog toga pri odabiru materijala treba voditi računa da su mehanička svojstva adekvatne čvrstoće i na povišenim temperaturama. Zagrijanje namota Θ_1 u kratkom spoju računa se prema relaciji (1a) za Cu vodič, odnosno prema (1b) za aluminijske vodiče i ono ne smije prema standardu biti veće od 250°C za bakar, odnosno 200°C za aluminijski namot kada se radi o izolacijskom sustavu toplinske klase A, [8]. Za više toplinske klase uljnih transformatora standard ne definira dozvoljena zagrijanja u kratkom spoju. Praksa je nekih proizvođača transformatora da za gornju granicu koriste maksimalno zagrijanje u kratkom spoju suhih transformatora više toplinske klase.

$$\Theta_1 = \Theta_o + \frac{2 \cdot (\Theta_o + 235)}{\frac{106000}{\Gamma^2 \cdot t} - 1} \quad (1a)$$

$$\Theta_1 = \Theta_o + \frac{2 \cdot (\Theta_o + 225)}{\frac{45700}{\Gamma^2 \cdot t} - 1} \quad (1b)$$

gdje je: Θ_o – početna temperatura namota koja odgovara zbroju maksimalne temperature okoline u kojoj transformator radi i zagrijanja namota mjenog promjenom otpora pri nazivnom teretu, (°C).

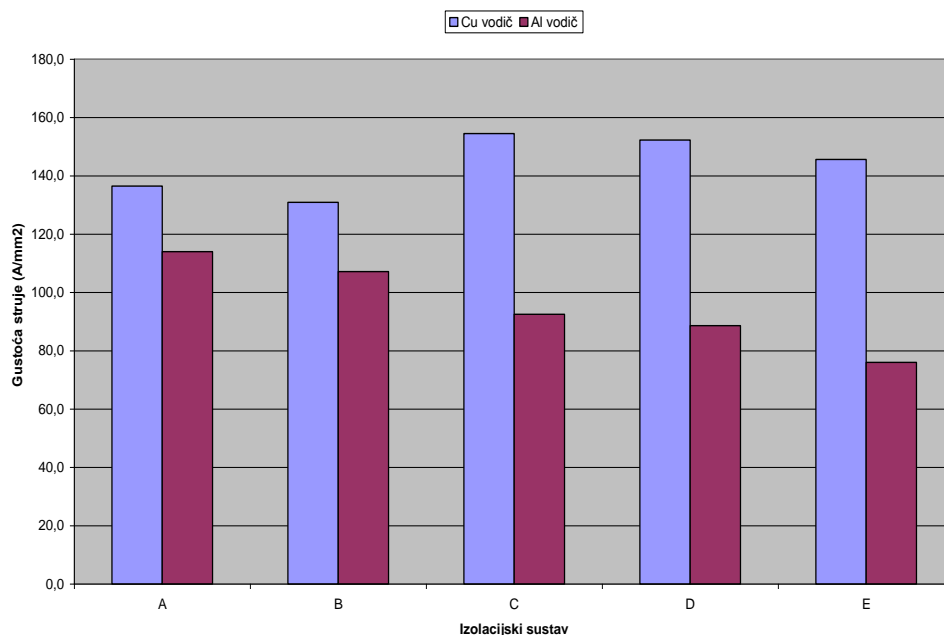
Γ - gustoća struje u namotu u kratkom spoju, točnije efektivne vrijednosti simetrične komponente struje kratkog spoja, (A/mm²).

t - trajanje kratkog spoja u sekundama, (obično se uzima t=2 s).

Nakon preuređenja (1) može se izračunati dozvoljena gustoća struje kratkog spoja za izolacijske sustave prema tablici I.:

- izolacijski sustav A, konvencionalni, mineralno ulje i srednje zagrijanje namota $\Theta_{n,sr}=65$ K,
- izolacijski sustav B, poluhibridni, mineralno ulje i $\Theta_{n,sr}=75$ K,
- izolacijski sustav C, hibridni, mineralno ulje i $\Theta_{n,sr}=95$ K,
- izolacijski sustav D, homogeni, sintetički ester i $\Theta_{n,sr}=100$ K,
- izolacijski sustav E, homogeni, silikonsko ulje i $\Theta_{n,sr}=115$ K.

Trajanje kratkog spoja je 2 sekunde, a za maksimalnu temperaturu Θ_1 su uzete vrijednosti iz [8], tablica 3, kolona 3. Rezultati proračuna za namote iz bakra i aluminijske su prikazani na slici 2. Vidimo da se u slučaju Al namota dozvoljena gustoća struje u kratkom spoju smanjila od 114 A/mm², za konvencionalni izolacijski sustav A, na 76 A/mm² kod homogenog izolacijskog sistema E sa silikonskim uljem. To je posljedica činjenice da maksimalna dozvoljena temperatura u kratkom spoju aluminijske ne ovisi o toplinskoj klasi izolacijskog materijala, već je uvijek ista 200°C. Kod bakra dozvoljena temperatura za izolacijske sustave A i B iznosi 250°C, dok za C, D i E iznosi 350°C. Ovo ograničava veću primjenu Al namota u specijalnim transformatorima, gdje specifičnosti pogona zahtijevaju izvedbe aktivnog dijela više toplinske klase.



Slika 2. Dozvoljene gustoće struja u Cu i Al namotima u kratkom spoju za različite izolacijske sustave

4. ANALIZA I PRIMJER PRIMJENE NOVIH MATERIJALA

4.1 Distributivni transformatori

Na primjeru trofaznog uljnog distribucijskog transformatora nazivne snage 1000 kVA, 20/0,42 kV, gubitaka praznoga hoda $P_0=1400$ W, nazivnih gubitaka tereta $P_{tn}=10500$ W i s prirodnim hlađenjem ONAN ili KNAN, istraženo je kako primjena različitih izolacijskih sustava utječe na ukupnu masu transformatora. Za granična zagrijanja namota i ulja uzete su vrijednosti prema tablici I, dok su izolacijski sustavi A, B, C, D i E definirani u 3.3.3. Rezultati proračuna su prikazani u tablici IV, pri čemu je za 100 % uzeta ukupna masa transformatora s konvencionalnim izolacijskim sustavom, (mineralno ulje i kruta izolacija na bazi celuloze).

Tablica IV. Izolacijski sustavi i ukupna masa transformatora

Izolacijski sustav	A	B	C	D	E
Ukupna masa transformatora	100	96,9	95,3	90,9	86,8

Pri proračunu nisu mijenjani nazivni gubici transformatora, pa su uštede na ukupnoj masi samo 13,2 %. Veće bi se uštede mogle dobiti ako bi se dozvolilo povećanje gubitaka i primijenio efikasniji način hlađenja, na primjer umjesto hlađenja KNAN upotrijebilo hlađenje KNAF.

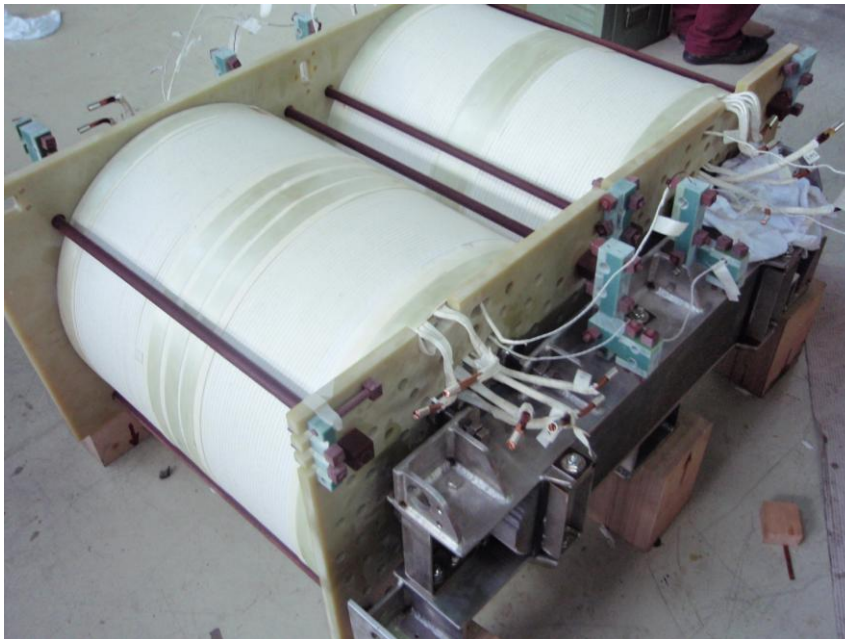
4.2 Transformator za elektromotorni vlak

Primjena materijala više toplinske je najčešća na području specijalnih transformatora. Jedan od primjera su transformatori za elektrovučna vozila, gdje se osim zahtjeva za minimum dimenzija i mase postavlja dodatni zahtjevi kao što su povećana sigurnost od nastanka požara, očuvanje životne okoline i korištenje ekološki prihvatljivijih materijala, neškodljivih za okolinu u slučaju curenja, odnosno havarije vozila s kojim transformator putuje.

Za potrebe KONČAR – Električna vozila d.d. razvijen je transformator za elektromotorni vlak, sljedećih karakteristika:

Nazivna snaga:	1510 kVA
Nazivni napon:	25000/4x800/1000/400/340 V
Nazivna frekvencija:	50 Hz
Hlađenje:	KDAF
Rashladna i izolacijska tekućina:	Midel 7131
Toplinska klasa:	F
Ukupna masa:	3460 kg

Transformator je projektiran s homogenim izolacijskim sustavom tipa D i ispitan prema važećem standardu za vučne transformatore, [9]. Detaljan opis upotrebljenih materijala i njihove međusobne kompatibilnosti opisan je u referatu [10]. Aktivni dio transformatora je prikazan na slici 3.



Slika 3. Aktivni dio transformatora za elektromotorni vlak

5. ZAKLJUČAK

Opisani su nekonvencionalni izolacijski sustavi koji se danas koriste u gradnji distributivnih, energetskih i specijalnih uljnih transformatora. Dan je pregled karakteristika materijala više toplinske klase koje novousvojeni standard IEC/TS 60076-14 preporuča za korištenje u industriji transformatora.

Ukazano je na nedovoljno istražena područja dielektrične čvrstoće i podnosivih napona izolacije o kojima projektanti moraju voditi računa pri projektiranju transformatora s nekonvencionalnim izolacijskim sustavom. Istraživanja na modelima su potrebna u slučaju gradnje transformatora viših napona.

Napravljena je usporedba efikasnosti hlađenja namota s nekoliko alternativnih ulja. Pokazalo se da je silikonsko ulje dobar rashladni medij za hladna područja, a ne preporuča se korištenje prirodnog estera na niskim temperaturama zbog visoke točke staništa u odnosu na sintetički ester i mineralna ulja.

Pokazano je da aluminij nije prikladan za namote transformatora više toplinske klase zbog relativno niske maksimalno dozvoljene temperature u kratkom spoju.

Na primjeru distributivnog transformatora standardnih karakteristika je istražen utjecaj primjene nekonvencionalnih izolacijskih sustava na ukupnu masu transformatora i pokazano da je smanjenje mase ispod 15% u odnosu na konvencionalni sustav, ako gubici i način hlađenja ostanu isti. Znatnije se uštede mogu postići uz veće gubitke, ali to zahtijeva upotrebu efikasnijeg rashladnog sustava.

Opisane su glavne karakteristike transformatora za elektromotorni vlak na kojem je primijenjen homogeni izolacijski sustav toplinske klase F i korišten sintetički ester kao tekući dielektrik i rashladni medij.

6. LITERATURA

- [1] IEC/TS 60076-14 Power transformers – Part 14: Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials, Edition 2.0, 2009-05.
- [2] Cooper Power Systems: Medium and Large Power Transformer Users List Retrofill & New Installations, Bulletin B900-04062, December 2008.
- [3] CIGRE WG A2-35 Technical Brochure: Experience in service with new liquids, (u pripremi)
- [4] A. Darwin, C. Perrier, P. Foliot: The use of natural ester fluids in transformers, Proceedings of MATPOST conference, Lyon (France), Paper 0036, November 15-16, 2007.
- [5] Kevin J. Rapp: CIGRE 2008, A2 Pref. Subject No 1, Question 1-1, Contribution USA 2074.
- [6] R.L. Grubb, M. Hudis, A.R. Traut: A transformer thermal duct study of various insulating fluids, IEEE Transactions on PAS-100(1982), 2, 466-473.
- [7] S. Tenbohlen, M. Koch, D. Vukovic, A. Weinläder, J. Baum, J. Harthun, M. Schäfer, S. Baker, R. Frottscher, D. Dohnal, P. Dyer, Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers, CIGRE 2008, Paper A2-102.
- [8] IEC 60076-5 Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit, Third edition, 2006-02.
- [9] IEC 60310 Railway applications – Traction transformers and inductors on board rolling stock, Third edition, 2004-02.
- [10] I. Radić, A. Mareković, I. Sitar, B. Domitrović. Izolacijski materijali više toplinske klase, 9. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat 8. – 12. studenoga 2009. Referat D1-xx.